УДК 539.43:539.376

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

С.Я. Куранаков, Л.И. Огородов*

Алтайский государственный технический университет. г. Барнаул
*Вологодский государственный технический университет
E-mail: sle@agtu.secna.ru

Приводятся результаты экспериментальной проверки кинетических уравнений силового, энергетического и наследственного типов на трубчатых образцах жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ при температуре 800 °С. Опытные данные получены для условий нестационарного ступенчатого нагружения при линейном и сложном напряженном состоянии.

Обеспечение и повышение работоспособности энергетического оборудования в значительной степени зависит от правильной оценки долговечности отдельных деталей и элементов конструкций. В частности лопатки газотурбинных установок, являясь особо напряженными элементами, при пусках работают в условиях малоцикловой усталости и высоких температур. Кроме того, они повергаются нестационарному нагружению, что существенно влияет на процессы деформирования и их долговечность.

Процесс разрушения любого твердого тела требует определенного времени и, как правило, разбивается на две стадии: стадию развития повреждений, рассеянных (диссеминированных) по множеству микроскопических объемов, и стадию роста одной или ряда магистральных трещин, приводящих к разрушению сплошности тела и в дальнейшем к его полному разрушению [1]. В зависимости от материала, условий термомеханического нагружения и характера напряженного состояния относительные продолжительности стадии развития диссеминированных повреждений и роста одной или ряда магистральных трещин, приводящих к разрушению элемента материала, и их общая продолжительность могут быть различными. В условиях свободных деформаций и при отсутствии острых концентраторов напряжений стадия роста магистральной трещины непродолжительна по сравнению со стадией диссеминированных повреждений.

Для описания процесса накопления повреждений материалов используют различные варианты кинетических уравнений, которые требуют проверки при сложных нестационарных нагружениях.

В общем случае напряженного состояния мера повреждений П ($0 \le \Pi(\tau) \le 1$) может быть выражена в форме некоторого инварианта тензора повреждений [2]

$$\Pi = \pi_i + C\pi_0,$$

где $\pi_i = \sqrt{(2/3)\cdot\sum_{i,j}\pi_{ij}^2}$ – интенсивность повреждений; π_{ij} – компоненты девиатора; π_0 – компоненты шарового тензора напряжений; C – экспериментально определяемая постоянная (может быть задана на основе допущений).

Условие разрушения записывается как равенство

$$\Pi=1.$$

В работе [3] для расчета диссеминированных повреждений в жаропрочном сплаве на никелевой основе ХН65ВМТЮ (ЭИ-893) при нестационарных режимах пропорционального мягкого циклического нагружения с частотами ν_1=3...5 и ν_2=0,25...0,45 цикл/мин в условиях линейного и плоского напряженного состояния при рабочей температуре 800 °С применялись феноменологические уравнения накопления повреждений энергетического и силового типов.

Для расчета повреждений малоцикловой усталости при нестационарных (блочных) режимах нагружения применяется уравнение, разработанное на кафедре сопротивления материалов СПбГПУ, которое учитывает как накопление односторонних вязкопластических деформаций до и после стабилизации петли, так и изменение самой петли гистерезиса [1]

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_{\text{P}}} + \sum_{k=1}^{N}\varphi\left(\frac{\omega_k}{\omega_{\text{P}}}\right) + \sum_{k=1}^{N} f\left(\frac{\Omega_k}{\omega_{\text{P}}}\right), \qquad (1)$$

где $\bar{\sigma}_{\max}$ – максимальное (главное) напряжение на момент определения повреждения; $\bar{\sigma}_{\text{P}}$ – истинное сопротивление разрыву; N – число циклов нагружения; ω – площадь расчетной петли пластического гистерезиса за цикл; Ω – работа односторонне накопленной пластической деформации в цикле; ω_{P} – площадь под кривой статического разрушения.

Функциональные параметры $\varphi(\frac{\omega}{\omega_{\text{P}}})$ и $f(\frac{\Omega}{\omega_{\text{P}}})$ находятся из опытов на малоцикловую усталость при линейном напряженном состоянии. Параметр $\varphi(\frac{\omega}{\omega_{\text{P}}})$ определяется по кривой усталости при частоте нагружения 3...5 цикл/мин, когда отсутствует одностороннее накопление вязкопластических деформаций. Второй функциональный параметр $f(\frac{\Omega}{\omega_{\text{P}}})$ определяется по кривой усталости при частоте нагружения 0,25...0,45 цикл/мин, когда функция $\varphi(\frac{\omega}{\omega_{\text{P}}})$ считается уже известной.

В случае сложного напряженного состояния величины ω и Ω определяются как суммы их значений по всем компонентам девиатора напряжений за цикл, то есть

$$\omega = \sum_{i,j} \omega_{ij}; \quad \Omega = \sum_{i,j} \Omega_{ij}.$$

Для описания процесса накопления повреждений при ползучести в условиях линейного напряженного состояния и стационарного нагружения используется известное кинетическое уравнение силового типа, отвечающее принципу линейного накопления повреждений [1, 4, 5]:

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = f(\sigma). \quad (2)$$

Функциональный параметр $f(\sigma)$ определяется по уравнению кривой длительной прочности при линейном растяжении, построенной в координатах: истинные напряжения – логарифм времени до разрушения. Функция, отражающая влияние напряжений, выражается в виде

$$f(\sigma) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0},$$

где A_0, C_0 – экспериментальные константы.

Таким образом, текущая поврежденность вычисляется по формуле

$$\Pi = \int_0^{\tau} \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0} d\tau.$$

Предполагается, что при знакопеременном нагружении в полуцикле сжатия повреждения не накапливаются.

В случае сложного напряженного состояния уравнение (2) принимает вид

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = f(\sigma_э),$$

где $\sigma_э$ – эквивалентное напряжение, которое подбирается из условия совпадения кривых длительной прочности при различных напряженных состояниях в координатах $\sigma_э - \lg\tau_P$.

Функция $f(\sigma_э)$ при этом имеет форму

$$f(\sigma) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma_э}{A_0}. \quad (3)$$

Анализ наиболее распространенных критериев разрушения показывает, что наиболее приемлемой формой выражения эквивалентного напряжения является та, которая соответствует критерию Писаренко-Лебедева [6] и определяется из соотношения

$$\sigma_э = \chi \sigma_i + (1-\chi)\sigma_1, \quad (4)$$

где χ – величина, характеризующая степень участия в макроразрушении сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования трещин.

На основании (3 и 4) условие разрушения при стационарном нагружении и сложном напряженном состоянии запишется следующим образом

$$\Pi = \frac{1}{C_0} \exp\left(\frac{\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1}{A_0} \right) \tau, \quad (5)$$

где σ_1 – главное напряжение; σ_i – интенсивность напряжений.

В работах [7–9] для описания процесса диссеминированных повреждений в сталях и сплавах использовалось кинетическое уравнение наследственного типа в скалярной форме

$$\Pi = \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}_э(\theta) K(\tau - \theta) d\theta, \quad (6)$$

где $\tilde{\sigma}_э(\theta)$ – режим изменения приведенного эквивалентного напряжения [7]; $K(\tau-\theta)$ – функция влияния (ядро), определяемая по уравнению статической усталости материала; θ – время. В случае малоциклового нагружения появляется возможность использования комбинированного уравнения повреждений, учитывающего повреждения статической и циклической усталости [7],

$$\Pi = \Pi_{ст} + \Pi_{ц}.$$

в котором полная поврежденность П к моменту разрушения по-прежнему равна 1. Однако в ряде случаев ур. (6) оказывается достаточным для проведения расчетов по [8]. При многоцикловом нагружении может быть использовано уравнение вида

$$\Pi = \int_0^{\tau} \tilde{\sigma}_{э\max}(\theta) L(\tau - \theta) d\theta, \quad (7)$$

где П – суммарная поврежденность статической и циклической усталости; $L(\tau-\theta)$ – функция влияния, определяемая по кривой усталости при данном коэффициенте асимметрии цикла изменения всех компонентов напряжений, данных частоте нагружения и температуре [1, 7, 10].

В работе [11] предложено использовать в случае циклического нагружения полимерных материалов кинетическое уравнение

$$\Pi = \int_0^{N} \tilde{\sigma}_{\max}(n) M(N-n) dn, \quad (8)$$

где в качестве независимой переменной используется число циклов нагружения (при постоянном коэффициенте асимметрии), которое обязательно является целым. Понятие производной условно применимо здесь лишь при достаточно большом числе циклов [1]. Числа циклов N и n должны быть достаточно большими, так как повреждающее действие переходных циклов при нестационарных режимах, разделяющих различные блоки регулярных циклов, как правило, неизвестно. При оценке общей поврежденности такие переходные циклы не принимаются во внимание, что допустимо, если их число мало по сравнению с числом одинаковых регулярных циклов в каждом блоке.

Использование ур. (8) при расчете поврежденности в условиях нестационарного нагружения с изменяющейся от блока к блоку частотой затруднительно и связано с перерасчетом числа циклов на последующих ступенях. При использовании в этом случае ур. (5 и 7) следует учитывать, что частота нагружения в пределах ступени (блока) нагружения при поддержании заданного значения истинных напряжений изменяется, но, как это было в

опытах, незначительно, а влияние изменения частоты (с 3 до 5 или с 0,25 до 0,45 цикл/мин) не сказывается на параметрах кривой усталости.

Расчетные меры повреждений на момент фактического разрушения образцов сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ-893) при нестационарных режимах циклического (коэффициент асимметрии цикла $R_\sigma=-1$) высокотемпературного (T=800 °C) нагружения по кинетическим уравнениям наследственного типа (7 и 8) сопоставляются со значениями меры, полученными согласно уравнениям (1 и 5). Частоты нагружений (ν_1=3...5 цикл/мин и ν_2=0,25...0,45 цикл/мин) при нестационарных режимах нагружения либо чередовались на каждой ступени, либо частота оставалась постоянной, но при этом менялось напряжение $\overline{\sigma}_{max}$. В случае линейного напряженного состояния (растяжение-сжатие) величины меры повреждений на момент фактического разрушения образцов для серии из восьми нестационарных режимов нагружения (от двух до пяти ступеней в каждом) составляют по уравнению:

(1) 0,986...1,051 со средним арифметическим значением – 0,998;

(5) 0,619...1,107 со средним – 0,831;

(7) 0,881...1,087 со средним – 0,996;

(8) 0,934...1,086 со средним – 0,998.

Режимы нестационарного нагружения и результаты расчетов в случае плоского напряженного состояния (растяжение-сжатие с кручением) приведены в таблице.

Таблица. *Результаты испытаний и расчета меры повреждений при плоском напряженном состоянии и симметричном нагружении*

Номер режима	Номер ступени	σ_{xx}, МПа	$\tau_{x\theta}$ ($\tau_{\theta x}$), МПа	$\sigma_э$, МПа	Частота нагружения	N_k, цикл	Расчетная поврежденность в момент разрушения по уравнениям		
							(1)	(5)	(8)
9	I	378	291	576,4	ν_1	150	1,129	1,785	0,953
	II	378	291	576,4	ν_2	41			
10	I	342	263	521,4	ν_2	130	1,007	1,780	1,019
	II	360	277	548,9	ν_1	110			
	III	330	254	503,2	ν_2	104			
Среднее значение меры повреждений							1,068	1,783	0,986

ν_1=3...5 цикл/мин; ν_2=0,25...0,45 цикл/мин

Анализ расчетных значений меры повреждений позволяет заключить, что ур. (5) линейного суммирования повреждений менее точно, чем уравнения (1, 7, 8), предсказывает момент разрушения. Уравнения энергетического типа (1) и наследственного типа (7 и 8) могут использоваться в расчетной практике, в частности при оценке долговечности элементов конструкций, работающих в условиях сложного циклического нагружения сталей и сплавов при высоких температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. – Л.: Машиностроение, 1988. – 252 с.
2. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
3. Куранаков С.Я. Длительное сопротивление жаропрочного сплава при циклическом нагружении с учетом ползучести: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1992. – 16 с.
4. Бронз В.Х. Высокотемпературная ползучесть и длительное разрушение конструкционного жаропрочного сплава при сложном термомеханическом нагружении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1982. – 16 с.
5. Павлов П.А., Курилович Н.Н. Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении // Проблемы прочности. – 1988. – № 2. – С. 44–47.
6. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1976. – 416 с.
7. Павлов П.А., Огородов Л.И. Длительное сопротивление материалов с наследственными свойствами // Длительное сопротивление конструкционных материалов и вопросы расчета элементов конструкций: Межвуз. сб. – Вологда: ВоПИ, 1991. – С. 4–10.
8. Павлов П.А., Белов А.С., Огородов Л.И. Поврежденность сплава ХН65ВМТЮ при блочном режиме нагружения // Прогнозирование механического поведения материалов. – Новгород, 1991. – Т. 2. – С. 84–93.
9. Курилович Н.Н., Огородов Л.И., Павлов П.А. Оценка накопления повреждений в сталях с помощью силовых уравнений наследственного типа // Весцi Акадэмii навук Беларусi. Сер. фiз.-тэхн. навук. – 1992. – № 4. – С. 34–39.
10. Куранаков С.Я., Огородов Л.И. О применимости уравнения повреждений наследственного типа для расчета момента разрушения сплава ЭИ-893 // Прочность и живучесть конструкций: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Вологда, 1993. – С. 146–147.
11. Щербаков В.И. Исследование закономерностей накопления повреждений в полимерных материалах на примере поливинилхлорида: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1977. – 19 с.